

災害時の屋内3Dマップ生成のための 可動ノードの協調探索手法の提案

勝間 亮^{1,a)} 山本 眞也^{2,b)} 柴田 直樹^{3,c)}

概要：本稿では、災害後の屋内環境がどのように変化しているかを知ることができる3Dビューマップを自動作成するために、複数の可動ノードが協調して移動することにより、短時間で屋内をすべて探索する問題を定式化し、解決手法を提案する。建造物の内部にはあらかじめ短い間隔でマーカが埋め込まれているとし、探索可能なすべてのマーカを1つ以上の可動ノードが訪れたときに探索完了とみなす。提案手法ではできるだけ手広く探索を行えるよう、他のノードと探索済みの領域に関する情報交換を行う。また、できるだけ手広く探索を行えるよう、同じ地点に存在する他のノードと情報交換を行い、各方向に進むノードの数を均等化するよう各ノードの移動先を決定する。

1. はじめに

災害が起きた場合、スムーズな救助活動を行うことが重要である。例えば、地震で倒壊した棚などの下敷きになり身動きの出来なくなった人や、自力での移動が困難な傷病者をいち早く救助することができれば、地震後の火災などの二次災害に巻き込まれるケースを減らすことができる。災害後の屋内の様子を短時間で詳細に知ることができれば、傷病者の発見、救助隊が到着した後の傷病者の運搬経路を決定する際に有用である。しかし、屋内環境は壁や天井の崩壊、家具などの倒壊などにより災害前と大きく変化しており、災害前の間取り図などが役に立たないケースもあり、救助隊員が屋内に入り音声による現場の状況報告を行うだけでは、救助隊全員が屋内環境の詳細を把握することが難しい。

そこで、特定の領域の状況を詳細に知ることのできる手段として、Google ストリートビューをはじめとした3Dビューマップがある。3Dビューマップは領域内の各地点から様々な角度で撮影した複数の写真を合成することにより、3D仮想空間を作り、コンピュータ上で位置と視点を操作することで、あたかも自分が領域内いて全方位を見渡

しているかのように、直観的に領域内の様子を知ることができる。首都直下地震などの大規模災害では救助隊員が不足しがちであるため、まだ救助隊員が到着していない建造物に対して、あらかじめ移動可能なロボットによって自動的に屋内の3Dビューマップを作成しておくことが望ましい。その際、救助活動前になるべく多くの建造物に対して3Dビューマップを作成するため、3Dビューマップを作成する時間を短くすることが求められる。

災害救助のためのロボットの研究は盛んに行われており、ロボカップレスキューなどでその性能などが評価されている[1]。Koらは要救助者を発見するための無線通信で操作可能な移動ロボットを提案した[2]。亀川らは狭いスペースにも入り込んで生存者を発見できるように、カメラとマイクロホンを搭載した蛇型のロボットを提案した[3]。これらは要救助者の生存シグナルを検知することを主たる目的としており、いち早く屋内マップを生成する際には適さない。

3Dビューマップの作成に関する研究も盛んに行われている。Chouらはモバイルプラットフォーム上に設置したレーザレンジファインダを用いて、3Dマップを作成するシステムを提案した[4]。この手法では高価で大きい機材を用いるため、移動のための力強く安定した機構が必要となり、導入コストが大きくなってしまふ。

Skrzypczynskiは自己位置推定と環境地図作成を同時に行うSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)問題に対して、各ノードが撮影した複数の画像のうち静止物体に関する特徴点を見つけ出し、それらをもとに画像を合成する手法を提案した[5]。しかし、この手法では特徴点がはっ

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

² 山口東京理科大学大学
Tokyo University of Science, Yamaguchi, Japan

³ 奈良先端科学技術大学院大学
NAIST, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

^{a)} ryo-k@mi.s.osakafu-u.ac.jp

^{b)} shiny-ya@rs.tus.ac.jp

^{c)} n-sibata@is.naist.jp

きりしない場合などがあり、確率的に判断して位置推定や地図生成を行うため、生成された地図と実際の環境との間にギャップが生まれる可能性がある。

そこで本稿では、災害時に安価な機材でなるべく早く正確な屋内 3D ビューマップを生成するために、未知の領域をくまなく探索する移動可能な小型ノード（可動ノード）の協調移動方式について提案する。まず、あらかじめ建物の建築時もしくはシステム導入時に、人の目で見ることのできない紫外線でのみ読み取り可能な AR マーカを数メートル程度の短い間隔で貼っておく。可動ノードはマーカに組み込まれている固有のマーカ ID 情報から、マーカを頂点とし、あるマーカから認知可能な他のマーカの集合を辺としたグラフを作成することにより、探索済みの領域や未探索の領域を把握する。この環境において探索可能なすべてのマーカを 1 つ以上の可動ノードが訪れ、それを知るノードが探索開始位置に帰還するまでの時間を最短化する問題を定式化する。この問題を解決するために、各可動ノードの移動経路を決定する手法を提案する。提案手法ではできるだけ各ノードが探索する箇所の重複を避けるため、ノードの移動先を決定する際には周囲のノードと通信を行い、なるべく移動先の候補に対してノードの数を均等にする。また、各ノードは定期的に他のノードとの通信を試み、通信に成功したノード同士がお互いの探索済みエリアの情報を交換することで協調して領域を探索していく。周囲がすべて探索済みとなったノードは、最も近い未探索のマーカに移動する。

救助活動を行うにあたっては 2D マップ上から詳細な情報を知りたい箇所を選択して、3D ビューマップを表示させることが望ましい。そのため、簡易な 2D マップの作成方法についても述べる。

また、本稿では詳しくは取り扱わないが、別のマーカ導入の利点として、3D ビューマップ生成のための画像の合成の際に特徴点としても使用することができる。さらに、本来見えてはいけなはずの ID 番号を用意し、本棚の上部などにその ID をもつマーカを取り付けることで、本棚の倒壊が検知可能であることなど、マーカの応用は広範囲にわたる。

2. 問題設定

本稿のねらいは、屋内 3D ビューマップを生成するための、未知の屋内領域を複数の可動ノードで短時間で探索する手法の提案である。本章では、建物内にあるベースステーションから複数の可動ノードを出発させ、ノード同士やノードとベースステーション間の無線通信によって探索可能な範囲のマップ情報がすべてベースステーションに収集できるまでの時間を最短化する問題について述べる。



図1 ID を表現するマーカの例

2.1 環境設定

2.1.1 建物内の AR マーカ

災害が発生してから、探索対象の建造物のマップデータを各ノードにインプットすることは非常に大きな時間ロスになると思われる。マップデータをあらかじめ作成し、どこかのサーバに保管しておき、それらをダウンロードする方法では、災害時のネットワーク状態によっては使用できない可能性がある。そのため、探索対象の建造物の内部マップは未知の状態、3D ビューマップを生成するための探索を行う。そこで、あらかじめ建造物の建築時もしくはシステム導入時に、AR マーカを数メートル程度の短い間隔で壁に設置しておく。図1で示す通り、マーカはビットパターンにより固有のマーカ ID を表現することができる[9]。可動ノードが3D ビューマップを生成するためにカメラで周囲を撮影する際、マーカを次々と発見していくことで通路の分岐の把握を行い、未探索の領域の存在を知ることができる。以降、1 つ以上の可動ノードが訪れたマーカを探索済みのマーカ、そうでないマーカを未探索のマーカと呼ぶ。

また、ノードは撮影した画像から曲がり角を判断することは難しい。そこで、通常のマーカの上部に追加のマーカを設置する。この追加のマーカには曲がり角専用の ID が割り振られており、一つの角に対して一つの固有 ID を、角を構成する 2 つのマーカに割り振る。ノードはその ID をもとに、通路の角を知ることができる。

2.1.2 可動ノード

可動ノードとしてはバッテリー駆動の地上走行型ノードや空中飛行型ノードを使用することができ、その例として Lego Mindstorms やクアッドコプターなどがある。Mindstorms はモータを制御するプログラミングが可能な機器やタイヤなどを用いることで、移動が可能なロボットを作成することができる[7]。クアッドコプターは 4 つのプロペラにより安定した飛行をすることができ、無線通信機や小型カメラなどの小型の機器を搭載しても飛行できることが知られている[6]。可動ノードは通信機、カメラ、小型 PC、その他ユーザが必要とする情報をセンシングする各種センサを搭載している。通信機は Zigbee を使い、その通信可能距離は機器の電波出力により数メートルから数キロメートルまで様々に変更可能であるが、可動ノードはバッテリーを節約する必要があるため、通信可能距離は 10[m] 程度で

あるとする。小型 PC の例としては LIVA があり、サイズは 118[mm] × 70[mm] × 56[mm] とコンパクトであるため、可動ノードに搭載することが可能である [8]。各種センサについては、例えば火災が伴う可能性のある状況であればサーモグラフィを用いるなどである。

可動ノードには固有の ID 番号が割り振られているとする。可動ノードはベースステーションから探索を開始し、マークを発見したとき、その ID を読み取り、自身の所持する探索済み領域の ID と照合を行う。探索済み領域は 2.2 節で述べる簡易マップにより表される。それが新たに発見した ID であれば簡易マップに追加し、他のノードと無線通信により情報交換を行うことで最新の簡易マップを共有する。

各可動ノードは探索領域内にあるベースステーションから探索を開始する。可動ノードがマーク v からの距離が d 以内に存在するとき、その可動ノードはマーク v の位置にあると言う。ただし、複数のマークからの距離 d 以内である地点が存在しないよう d を定める。可動ノードは自身が初めて到達したマークの位置から周囲 360 度の撮影を行う。このとき、他のマークを発見することができる。

2.2 簡易マップ構築

ここでは、各可動ノードが自身の記憶領域内に作成する屋内マップについて述べる。可動ノードがどの領域を探索すれば良いかの判断を行うためには、発見したマークの位置関係を把握しておく必要がある。そこで、各可動ノードはマークを頂点とし、隣接するマークの関係を辺としたグラフにより簡易屋内マップを記録していく。

探索済みのマークの集合を V とする。あるマーク $v \in V$ の位置からノードが認知可能なマークの集合を $E(v)$ とし、 E を任意の v に対する $E(v)$ の集合とすると、屋内の簡易マップは無向グラフ $G = (V, E)$ とみなせる。以降の記述では、あるノード s の所持する簡易マップとして、既に訪れたマークの集合を V_s 、あるマーク $v \in V_s$ の位置から周囲を撮影した画像上で認知可能なマークの集合を $E(s, v)$ とし、任意の $v \in V_s$ に対する $E(s, v)$ の集合を E_s とする。**探索開始時の簡易マップ作成**

ノード s が探索を開始したとき、周囲を撮影した画像からマークを発見し、その位置へ移動し、そこを探索開始位置とする。このとき、 s の所持する簡易マップとして、 V_s には探索開始位置のマーク v_0 が、 E_s には $E(s, v_0)$ が格納される。

探索中の情報交換による簡易マップ更新

各ノードは定期的に HELLO メッセージを周囲に発信し、HELLO メッセージを受信したノードは応答 (ACK) を返信する。ノードは ACK を確認したとき、簡易マップの情報交換を行う。ノード s とノード t が通信に成功し、お互いの簡易マップ情報を交換したとき、 V_s および V_t をと

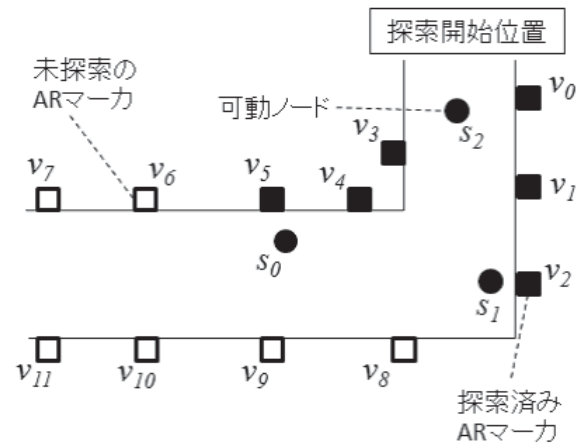


図2 ノードとマークの配置例

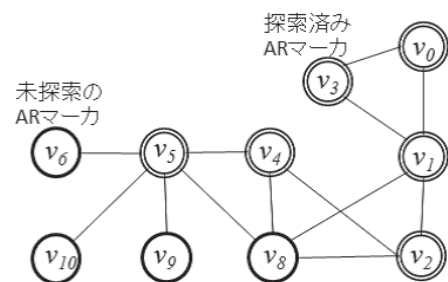


図3 簡易マップ

もに $V_s \cup V_t$ に更新する。同様に、 E_s および E_t をともに $E_s \cup E_t$ に更新する。

簡易マップの例を図2に示す。可動ノード s_0, s_1, s_2 が訪れたマークが $v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ であるとする。探索済みのマークの位置から確認可能なマークを線で結んだ簡易マップが図3である。図2におけるマーク v_7 はどの可動ノードからも確認不可能なため図3の簡易マップには載っておらず、ノードが v_6 や v_{10} などを訪れたときに簡易マップに追加される。この簡易マップ上ですべてのマークが探索済みになったとき、探索が完了となる。

2.3 問題の入出力、制約および目的

本問題の入力としてマークの集合 V 、可動ノードの集合 S を与える。出力は各可動ノードの移動スケジュールである。ここで、ノード s の移動スケジュールとは、探索終了までに s が訪れるマークの順列のことである。

制約条件は、移動スケジュールを適用した結果、探索可能なすべてのマークを1つ以上のノードが訪れることであり、2.2 節で述べたグラフ $G = (V, E)$ について、すべての $v \in V$ に対して $V = \bigcup E(v)$ となることである。また、各ノードの移動スケジュールについて、マークの順列の隣り合う2点は、グラフ $G = (V, E)$ の辺 E に含まれていないてはならない。

本問題の目的は、探索可能なすべてのマークを1つ以上のノードが訪れ、その情報を保持したノードが探索開始位

置に戻るまでの時間を最小化することである。

3. 提案手法

本章では、2章で定義した問題を解決する方法を述べる。

建物内にある通路が分岐している場合、一般的には複数のノードが同じ探索ルートを辿るよりも、分岐点で別々の方向を探索した方が効率が良い。しかし、探索対象の建物の間取りなどは未知であるため、分岐点でどの方向にどの程度の数のノードを配分すれば最適であるかは予測できない。そこで、探索領域の小さい分岐先に対して多数のノードが進む非効率的なケースを防ぐため、あるマークに到達したノードが次の移動先を決定するとき、その地点に存在する他のノードと情報交換を行い、移動先候補の各マークに対してなるべく均等なノード数になるよう配分する。

また、周囲に未探索の領域が無い状態のノードについて、2.2節で述べた簡易マップのうち、最も近い未探索のマークに移動する。その際の移動経路はホップ数を最短にする経路とし、ダイクストラ法により決定する。未探索のマークが存在しないときは探索が終了したことになり、ダイクストラ法により探索開始位置への最短経路を決定し、移動を行う。

3.1 未知エリア探索アルゴリズム

ここでは、ノードが未探索の領域に直面したときの移動先決定アルゴリズムを述べる。

ノード s_0 がマーク v_0 の位置に存在し、 v_0 からノードが認知可能かつ未探索のマークの集合を $E(v_0)$ とする。このとき、 s_0 は同じ場所に存在するノードと連携し、 $E(v_0)$ の要素数に対して均等な数になるようノードを割り当てる。 v_0 に存在するノード数を $E(v_0)$ の要素数で割り切れないとき、均等に割り当てることはできないため、ノード ID とマーク ID の対応付けを行い、2 個以上の差が出ないようにノードを割り当てる。この際、計算を行うノードは v_0 の位置に存在するノードのうち、最もノード ID が小さいものが行うとする。

ノード s_0 が実行する移動先決定アルゴリズムの詳細は以下の通りである。ここでは、 $E(v_0)$ の要素数を $|E(v_0)|$ と記述する。

- (1) マーク v_0 の位置 ($v_0.pos$) に到達したとき、 $v_0.pos$ に向かって移動中のノードおよび $v_0.pos$ に到達して次の行き先が決定していないノードに対して、ノード ID 情報および各ノードの位置から認知可能なマークの情報を交換する。
- (2) ステップ (1) で交換したノード ID のうち、 s_0 が最も小さければステップ (3) を実行。そうでなければ、計算結果を受信するまで待機してステップ (6) へ。
- (3) ステップ (1) で取得した n 個のノード ID を昇順にソートし、 $E(v_0)$ のマーク ID を昇順にソートする。

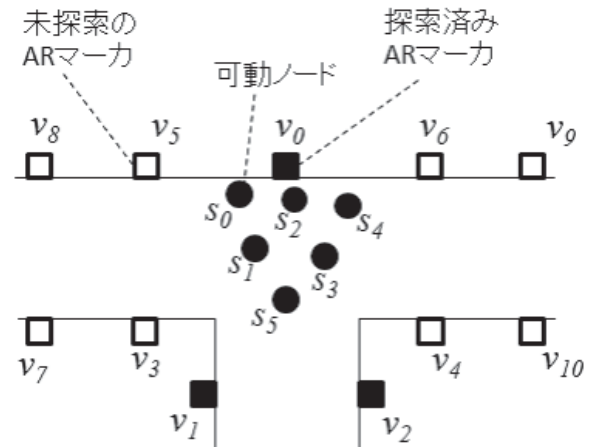


図4 アルゴリズム開始時の状況

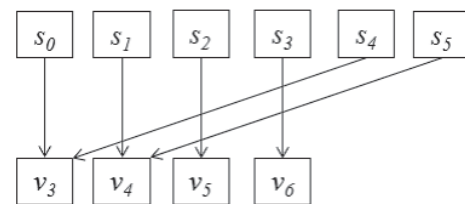


図5 マークに対するノードの割り当て

- (4) ステップ (3) でソートしたノード ID のうち、 i 番目の ID をもつノードを $E(v_0)$ の $i\%|E(v_0)|$ 番目の要素に割り当てる ($0 \leq i < n$)。
- (5) 各ノードに対して、割り当てたマークを通知。
- (6) 自身に割り当てられたマークに向かって移動開始。アルゴリズム終了。

アルゴリズムの動作例を示す。図4のように、マークが v_0 から v_{10} まで存在し、 v_1 と v_2 が探索済みであるとする。いま、ノード s_0 から s_5 が v_0 の位置に存在し、次に移動する先を上記アルゴリズムによって決定する過程を説明する。図中の v_i および s_j の i はマーク ID、 j はノード ID に対応しているとする。まず $s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ が情報交換を行い、ノード ID が最も小さい s_0 が計算を行うことを決定し、他のノードは計算結果の受信まで待機する。ここで、 s_0 は v_0 の位置から確認可能なマークの ID が $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$ であることを知る。ただし、 v_1 および v_2 は既に探索済みであるため、移動先の候補からは除外する。 s_0 は自信が確認可能なマークと情報交換により入手した未探索のマークの ID を統合して昇順にソートを行い、情報交換を行った各ノードの ID についても昇順にソートを行う。さらに、図5に示す通りにマーク ID とノード ID の対応付けを行い、各ノードに対してこの結果を通知する。各ノードは自身に割り当てられたマークに向かって移動を開始する。

3.1.1 2D マップの生成

簡易マップから人間が視覚的に認識可能な 2D マップを生成する方法を述べる。

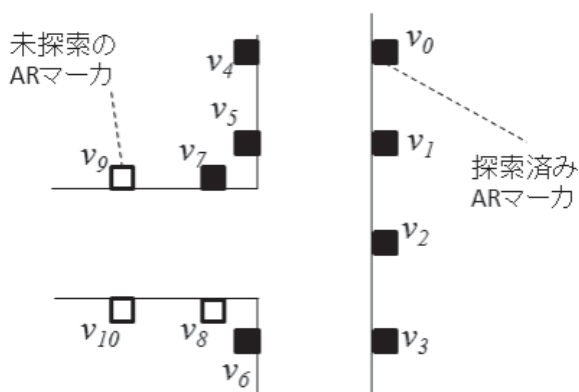


図6 マーカ配置図

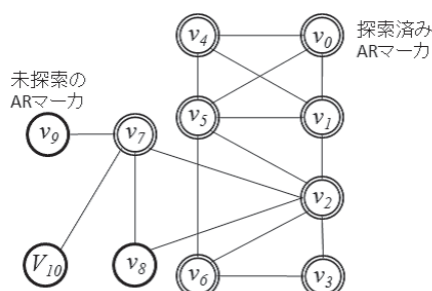


図7 作成された簡易マップ

マーカは壁に貼られているため、建物の壁は簡易マップにおける頂点を適切に結ぶことで表現可能である。ここでは、各マーカの座標と向きを知ることによって、壁が存在する箇所を推定していく。

未知エリア探索アルゴリズムのステップ(1)において移動先候補のマーカが決定するが、このときに各マーカが $v_0.pos$ の位置からどの方向に存在するかは、撮影位置と撮影角度を記録しておくことで知ることができる。可動ノードの移動先が決定した後、移動先のマーカに接近しつつ複数枚の写真を撮影することにより、その差分からマーカの貼られている向きと座標を割り出すことができる。

図6のように、マーカ v_5 と同じ向きに貼られているマーカ v_6 があるとする。 v_5 と v_6 の間に、それらとは異なる方向に貼られた他のマーカ v_7 が確認できた場合、そこに通路の分岐が存在すると判断して壁は無いと見なす。そうでない場合、例えば v_0 と v_1 の間には通路の分岐は存在せず、壁があると判断する。これを簡易マップ上で判断する方法としては、簡易マップ(図7)にマーカの方角の要素を加えたグラフを作成し、簡易マップの辺のうち交差している辺を除去した後に、同方向のマーカを結ぶ辺以外の辺を除去する。その結果、図8のように残った辺が壁であるとみなすことができる。

さらに、2章で述べたとおり、 v_5 と v_7 は通路の角を構成しているため、特殊マーカが使用されている。その情報をもとに v_5 と v_7 を結ぶ辺を追加することで、通路の曲がり角を表現することができる。

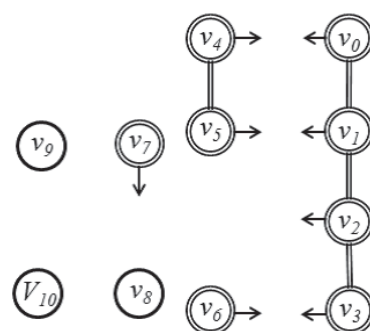


図8 簡易マップから2Dマップへの変換

4. おわりに

本稿では、災害救助支援のための屋内3Dビューマップを短時間で作成することを目的とした、可動ノードの協調移動方式を提案した。提案手法では、簡易マップを利用して可動ノードの移動先を動的に決定し、なるべく通路の分岐で均等にノードを割り振ることで探索効率を上げている。また、簡易マップにマーカの座標と向きの情報を加えることで、人間が認識可能な2Dマップを作成する方法についても述べた。

今後の課題としては、可動ノードの制作、テストベッドの構築、それらを用いた評価実験が挙げられる。

参考文献

- [1] ロボカップレスキュー: <http://www.robocup.or.jp/rescue.html>
- [2] Ko, A. W. Y. and Lau, Y. K. H.: "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Proc. of the 6th International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS 2007)*, pp.26–29 (2007).
- [3] T. Kamegawa, T. Yamasaki, H. Igarashi, and F. Matsuno: "Development of the snake-like rescue robot KOHGA," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp.5081–5086 (2004).
- [4] Yu-Shin Chou and Jing-Sin Liu: "A Robotic Indoor 3D Mapping System Using a 2D Laser Range Finder Mounted on a Rotating Four-Bar Linkage of a Mobile Platform," *Proc. of INTECH Int. J. of Advanced Robotic Systems*, pp.1–10 (2013).
- [5] Piotr Skrzypczynski: "SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING: A FEATURE-BASED PROBABILISTIC APPROACH," *Proc. of Int'l. J. of Applied Mathematics and Computer Science (AMCS)*, Vol. 19, No. 4, pp.575–588 (2009).
- [6] Achtelik, M., Tianguang Zhang, Kuhnlenz, K., Buss, M.: "Visual Tracking and Control of a Quadcopter Using a Stereo Camera System and Inertial Sensors," *Proc. of Int'l. Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA 2009)*, pp.2863–2869 (2009).
- [7] The LEGO Group: "LEGO Mindstorms," <http://www.lego.com/en-us/mindstorms/>
- [8] Elitegroup Computer Systems: "LIVA," <http://www.ecs.com.tw/LIVA/>
- [9] Shibata, N. and Yamamoto, S.: "GPGPU-Assisted Subpixel Tracking Method for Fiducial Markers," *Proc. of J. of Information Processing*, Vol.55, No.1, pp.19–28 (2014).